doi:10.13866/j.azr.2019.05.06

博斯腾湖流域干旱变化趋势及气候影响因素[①]

王　媛[1]，　焦　黎[1,2]，　董　煜[1]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐　830054；
2. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室，新疆 乌鲁木齐　830054）

摘　要：干燥度指数是反应地域干湿状况的一个指标，了解地区的干湿状况对当地农业发展、水资源科学管理及生态环境有着重要的作用。基于博斯腾湖流域5个气象站1970—2016年逐日气象数据，利用Penman-Monteith公式计算潜在蒸散量，并将该计算值和降水量之比，得到干燥度指数。运用5 a滑动平均、M-K检验、*R/S*分析等分析干燥度指数的多年变化特征；通过敏感性分析探讨气象因子对干燥度指数的敏感性。结果表明：博斯腾湖流域平均干燥度指数为13.9，属于干旱地区。1970—2016年博斯腾流域的干燥度指数呈现下降的趋势，未来干燥度指数的变化与历史变化相同。博斯腾流域在四季中冬季的干燥度指数最低，随着年代的变化，干燥度指数不断降低。各气象因子对干燥度指数的敏感性为：最高气温 > 相对湿度 > 平均风速 > 最低气温 > 日照时数 > 平均气温。

关键词：干燥度指数；敏感系数；博斯腾湖流域

IPCC第五次报告[1]指出，全球平均陆地和海洋表面的温度在1880—2012年间以0.12 ℃·(10a)$^{-1}$的速率上升，多年平均升温幅度达0.85 ℃，气候变暖已成为不争的事实。气候变化导致地面土壤的水分状况发生变化[2]，同时引起区域干燥指数的变化。对于干湿程度的定量化分析有单因子指标分析[3]、多因子指标分析[4]和综合指标分析[5]。运用最广泛的干燥度指数是对温度、风速、大气及水分等因素进行综合考虑，结合潜在蒸散量分析区域干湿状况。它被称为最能准确描述陆地表层实际的干湿状况和水热条件的指标[6]。区域干湿状况对农作物的生长以及水文变化都有着十分重要的影响[7-9]。据统计我国每年农作物因干旱受灾面积达2.0×10^7 hm^2。因此，研究干燥度指数对于制定防旱减灾措施、降低干旱风险以及对实施经济和农业可持续发展具有重要的指导意义[10]。干旱是主要灾害性气候之一[11]，是气候变化领域研究的一个热点问题。Nastos等[12]通过对干燥度指数的研究，预测欧洲南部将在21世纪末出现干旱。王利平等[13]研究表明，1961—2014年中国整体干燥度指数呈下降趋势，西北地区是干燥度指数最大的地区。王磊等[14]研究表明，干旱是西北地区最严重的自然灾害之一。吴燕峰等[15]研究表明，北疆地区全域较干旱，其中夏季和秋季干旱覆盖范围较大。博斯腾湖处于焉耆盆地，是典型的内陆湖泊。王俊等[16]研究发现，博斯腾湖流域降水呈增加的趋势。郭梦京等[17]研究发现，博斯腾湖水位的升降呈现波动趋势。上述研究都对气候变化下博斯腾湖流域水分变化情况进行了研究，而较少关注博斯腾湖流域干燥度指数的研究。本文以Penman-Monteith公式为基础计算干燥度指数，分析干燥度指数的变化特征；并运用敏感性分析计算干燥度指数对气象因子的敏感性，从而为博斯腾湖流域水资源优化配置及农业旱涝预警提供一定的理论依据。

1　研究区概况

博斯腾湖流域位于塔克拉玛干沙漠北缘，天山南麓焉耆盆地东南部(41°56′~42°14′N，86°26′~87°40′E)，包括博斯腾湖及上游开都河、木呼尔查干河、乌拉斯台河等流域。其中，博斯腾湖为新疆最大的内陆淡水湖泊。研究区属于暖温带大陆性气候，年平均气温7.9 ℃。1月平均气温 -12.7 ℃，极端低温 -30.2 ℃，平均水温0.6 ℃；7月平均气温

① 收稿日期：2019-02-27；　修订日期：2019-04-25
基金项目：新疆创新条件建设专项(2018D04026)资助
作者简介：王媛(1993-)，女，硕士研究生，主要从事流域水资源保护等工作. E-mail:1462185706qq.com
通讯作者：焦黎. E-mail:jiaolixjsd@sina.com

22.8 ℃,极端高温 38 ℃,平均水温 23 ℃。平均日照率达 67% ~68%。降水主要集中在 5—9 月,年均降水量约为 148.65 mm。

2 数据来源

利用巴音布鲁克、巴伦台、和静、库尔勒和焉耆气象站点(表 1)1970—2016 年逐日气象数据,包括(平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、风速、日照时数)。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn)和中国国家气象局。在数据的选择过程中,尽量选择没有数据缺失的站点,并对各个站点数据进行一致性的检验,使得数据的质量得到保障。季节划分采用气象季节,春季(3—5 月),夏季(6—8 月),秋季(9—11 月),冬季(12 月至翌年 2 月)。

表 1 气象站点位置

Tab.1 Information of the meteorological stations

编号	站名	经度(E)	纬度(N)	海拔/m
51467	巴伦台	86°20′	42°40′	1 752.5
51542	巴音布鲁克	84°09′	43°02′	2 458
51567	焉耆	86°34′	42°05′	1 055.8
51559	和静	86°40′	42°32′	1 100.9
51656	库尔勒	86°08′	41°45′	931.5

3 研究方法

3.1 Penman-Monteith 公式

$$ET_0=\frac{0.048\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{(T+273)}U_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)} \quad (1)$$

式中:ET_0为参考作物蒸散量,mm·d^{-1};Δ 为饱和水气压与温度曲线的斜率,kPa·℃$^{-1}$;R_n 为参考作物冠层表面净辐射,MJ·(m^2·d)$^{-1}$;G 为土壤热通量,MJ·(m^2·d)$^{-1}$,在逐日估算时 $G=0$;γ 为干湿表常数,kPa·℃$^{-1}$;T 为 2 m 高处的日平均气温,℃;U_2 为 2 m 高处的风速,m·s^{-1};e_s 为饱和水汽压,kPa;e_a 为实际水汽压,kPa。

$$R_n=(1-\alpha)\left(a_s+b_s\frac{n}{N}\right)R_a-\delta\left(\frac{T^4_{min,k}+T^4_{max,k}}{2}\right)$$

$$(0.56-0.08\sqrt{e_a})\left(0.1+0.9\frac{n}{N}\right) \quad (2)$$

式中:R_a 为大气顶层的太阳辐射(MJ·m^{-2}·d^{-1});N 为最大日照时数(h);n 为实际日照时数(h);δ 为波尔兹曼常数(4.903×10^{-9} MJ·K^{-4}·m^{-2}·d^{-1});$T_{max,k}$为最高绝对气温(K);$T_{min,k}$为最低绝对气温(K);a_s 为云全部遮盖下($n=0$)大气外界辐射到达地面的分量;b_s 为晴天($n=N$)大气外界辐射到达地面的分量;α 为地表反射度,取值 0.23。其中 R_a、a_s、b_s 的估算方法详见文献[18]。

$$e_s=0.3054\times\left[\exp\left(\frac{17.27T_{max}}{T_{max}+237.300}\right)+\exp\left(\frac{17.27T_{min}}{T_{min}+237.300}\right)\right] \quad (3)$$

$$e_a=RH\cdot e_s \quad (4)$$

式中:RH 为相对湿度,无单位;T_{max} 为日最高气温(℃);T_{min}为日最低气温(℃)。

3.2 干燥度指数

干燥度指数常用 AI 来表示:

$$AI=\frac{ET_0}{P} \quad (5)$$

式中:ET_0 为研究区潜在蒸散发(mm);P 为降水量(m)。

3.3 趋势分析

R/S 分析法也称重标极差分析法,是一种非线性分析方法。它给出一定的时间序列,然后计算相应时间跨度序列的极差 R 和标准差 S,并计算出 R/S 的比值。然后会发现 R/S 随着时间序列的变化呈现幂指数分布,这个幂指数就是 Hurst 指数[19]。Hurst 指数可以判断时间序列的持续性。0.5 作为分界点:当 $H=1$,称为完全预测围,即序列将围绕均值发生持续性的变化;当 $0.5<H<1$,表明时间序列的变化具有正持续性,即未来趋势与历史趋势相一致,H 越大,持续性越强,跟以往关系越密切;当 $H=0.5$,时间序列的变化既不是正持续也不是负持续,是完全随机的;当 $0<H<0.5$,表明时间序列变化具有负持续性,即未来趋势与历史趋势相反,H 越趋近于 0,其相反的趋势越强[20]。

M-K 非参数检验是世界气象组织推荐并已被广泛运用的非参数检验方法,常用于分析降水、气温、径流等气象水文要素序列的趋势变化[21]。对研究数据进行分析,使其在时间上呈现一定的趋势,并且在置信水平下,看其可信度是多少。当统计量 Z 的绝对值大于等于 1.28、1.64 和 2.23 时,分别表示通过了信度 90%、95% 和 99% 的显著性检验。

3.4 敏感性分析

干燥指数的敏感性分析就是指干燥指数变化率与气象因子变化率的比值，具体方法参见文献〔22〕。

4 结果与分析

4.1 干燥度指数的变化特征

4.1.1 干燥度指数的年际变化 通过5个站点的年平均值得到博斯腾湖流域干燥度指数年际变化特征（图1）。博斯腾湖流域1970—2016年的干燥度指数在1985年达到最大值，为36.4；2016年干燥度指数值最小，为5.5。平均干燥度指数为13.9。郑景云等[23]对中国的干湿状况进行了划分，干燥度指数小于1为湿润地区；干燥度指数大于1小于1.5为半湿润地区；干燥度指数大于1.5小于5为半干旱地区；干燥度指数大于5为干旱地区。说明研究区整体为干旱地区。干燥度指数波动变化且整体呈现出下降的趋势，通过图1干燥度指数的趋势线可以发现，干燥度指数的下降幅度约为1.027·$(10a)^{-1}$。通过5 a滑动平均曲线可以发现，1970—2016年存在2个明显的上升阶段，大致分为：1984—1986年、2008—2012年。2个明显的下降阶段，大致为：1986—1992年、2012—2016年。

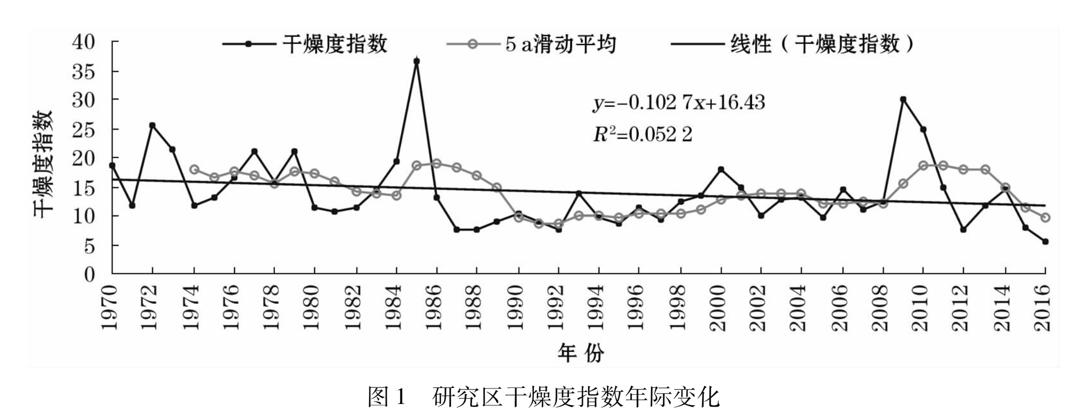


图1 研究区干燥度指数年际变化

Fig. 1 Interannual variation of dryness index in the study area

4.1.2 干燥度指数的趋势变化 对博斯腾湖流域5个气象站点的干燥度指数进行M-K趋势检验和R/S分析，结果如表2所示。5个气象站点干燥度指数最低的为巴音布鲁克，干燥度指数最高的是库尔勒。博斯腾湖流域干燥度指数整体呈现下降趋势，其中巴音布鲁克的干燥度指数通过了99%显著性检验；Hurst指数为0.75，说明巴音布鲁克的干燥度指数有正的持续性，未来变化趋势与历史变化趋势相同。巴伦台、和静、库尔勒、焉耆干燥度指数呈下降趋势，通过了置信度95%的显著性检验，焉耆站没有通过显著性检验。巴伦台、和静、库尔勒、焉耆的Hurst指数值均大于0.5，表明这4个站点未来干燥度指数变化依然呈现下降的趋势，与历史变化相同。

表2 各站点干燥度指数的趋势变化

Tab. 2 Trends of the dryness index at different meteorological stations

站点名称	干燥度指数	Z值	Hurst指数
巴音布鲁克	2.51	-2.34	0.75
巴伦台	5.05	-2.05	0.76
和静	19.14	-2.05	0.71
库尔勒	26.05	-1.31	0.61
焉耆	17.05	-0.84	0.74

4.1.3 干燥度指数的季节及年代变化 将5个站点的干燥度指数分为1970s、1980s、1990s、2000s、2010年以后5个阶段，每个阶段的季节距平值如表3所示。巴音布鲁克站夏季和冬季的距平值都为负值，夏季距平值小于冬季距平值；春季和秋季的距平值为正值，春季的距平值小于秋季的距平值，其中1970s冬季的距平值最低；巴音布鲁克站夏季为四季中干燥度指数最低的季节，在1970s干燥度指数值最低。巴伦台站1980s四季干燥度指数距平值为负值，说明1980s的干燥度指数最低。冬季的干燥度指数与春季、夏季、秋季相比较低，其中1980s春季距平值最低。和静站冬季的距平值全部为负值，说明冬季的干燥度指数小于多年平均干燥度指数，冬季的干燥度指数小于其他季节的干燥度指数；

表 3　各站点年代季节距平值

Tab. 3　Seasonal anomalies at different meteorological stations

站点	季节	1970s	1980s	1990s	2000s	2010 年以后
巴音布鲁克	春季	4.19	2.52	4.83	2.88	1.53
	夏季	-5.07	-7.04	-7.87	-6.80	-5.60
	秋季	2.32	10.58	5.95	5.88	5.66
	冬季	-1.45	-6.05	-2.91	-1.96	-1.59
巴伦台	春季	3.81	-5.55	14.24	17.31	53.27
	夏季	1.80	-2.78	7.01	8.05	26.11
	秋季	1.91	-2.07	7.12	8.65	26.04
	冬季	2.54	-3.70	9.49	11.54	26.06
和静	春季	102.98	55.44	15.00	21.32	28.94
	夏季	-22.16	28.40	-27.69	9.09	-25.30
	秋季	-32.62	-34.89	53.40	-1.75	26.77
	冬季	-48.20	-48.95	-40.72	-28.66	-30.41
库尔勒	春季	94.30	40.64	38.63	13.08	22.28
	夏季	-32.21	46.22	-23.34	-9.19	-9.37
	秋季	8.59	-32.50	38.29	35.17	2.80
	冬季	-70.68	-54.37	-53.59	-50.25	24.64
焉耆	春季	49.54	25.27	57.47	37.43	-9.19
	夏季	8.65	61.16	-36.54	-12.37	9.45
	秋季	-48.20	-31.40	24.83	1.52	1.78
	冬季	-86.40	-55.03	-45.75	-26.58	-2.05

1990s 和 2000s 的距平值相对于其他几个年代距平值较低。库尔勒站夏季和冬季的距平值都为负值,冬季的距平值小于夏季的距平值,即冬季的干燥度指数小于夏季的干燥度指数;随着时间的推移,干燥度指数逐渐降低。焉耆站冬季距平值为负值,冬季的干燥度指数值最小,干燥度指数随着年代变化逐渐变小。

4.2　干燥度指数的气候敏感系数

干燥度指数与潜在蒸散量有关,潜在蒸散量又与气象因子的变化有关。因此,选取平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度、平均风速 6 个气象因子,对干燥度指数进行敏感性分析,结果如表 4 所示。相对湿度 5 个站点的敏感系数均为负值,说明相对湿度与干旱指数呈负相关,即随着相对湿度的增加干燥度指数下降;最高气温、最低气温、日照时数、平均风速与干燥度指数呈正相关;平均气温在巴伦台站敏感系数为正值,剩余 4 个站点的敏感系数为负值。巴音布鲁克站相对湿度的敏感系数最高,平均风速的敏感系数最低;巴伦台站、和静站、库尔勒站、焉耆站最高气温的敏感系数最高,平均气温的敏感系数最低。平均气温在巴音布鲁克站敏感性最高,在巴伦台站最低。最高气温的敏感系数在库尔勒站最大,在巴音布鲁克站最低;最低气温在巴音布鲁克站的敏感性最高,在巴伦台站的敏感性最低;日照时数的敏感性在巴音布鲁克站最高,在和静站的敏感性最低;相对湿度的敏感性在巴音布鲁克站最高,在和静站的敏感性最低;平均风速的敏感性在库尔勒站最高,在巴音布鲁克站最低。博斯腾湖流域整体气象因子对干旱指数最为敏感的是最高气温,敏感性最低的是平均气温;相对湿度的敏感性高于平均风速的敏感性,最低气温的敏感性高于日照时数的敏感性。

表 4　气象因子对干燥度指数的敏感系数

Tab. 4　Sensitivity coefficients of meteorological factors to dryness index

站点	平均气温	最高气温	最低气温	日照时数	相对湿度	平均风速
巴音布鲁克	-0.317 1	0.334 9	0.231 9	0.145 5	-0.788 9	0.087 8
巴伦台	0.000 3	0.670 3	0.026 8	0.091 3	-0.298 2	0.314 3
和静	-0.003 9	0.681 2	0.198 9	0.073 4	-0.194 6	0.296 6
库尔勒	-0.079 8	1.038 9	0.227 2	0.097 7	-0.362 4	0.320 4
焉耆	-0.020 3	0.702 3	0.103 1	0.131 8	-0.407 1	0.215 3

5　讨 论

通过对干燥度指数的研究可以了解研究区的干湿程度,从而为当地农业发展提供一定的依据。王利平等[13]研究发现,中国西北地区干燥指数呈下降趋势,这与本文的研究结果相近。博斯腾湖流域多年干燥度指数呈下降的趋势。董煜等[24]研究发现,新疆参考作物蒸散量有着下降的趋势。任国玉等[25]预计西北干燥区绿洲降水量总体上增多,未来西北地区干燥度指数的变化趋势也将降低,与本研究结果一致。从 5 个站点的干燥度指数来看,巴音布鲁克和巴伦台的干燥度指数相对较低。因为巴音布鲁克与巴伦台海拔较高,山区降水较为丰富,因此干燥度指数较低。研究区最高气温对干燥度指数的敏感性最高,Penman-Monteith 模型对热量和空气动力进行综合的考虑,因此最高气温对参考作物蒸散量有着重要的影

响,对干燥度指数的敏感性也较高。郭旭新等[26]研究发现,陕北丘陵区对干旱影响最大的因素是气温,这与本研究结果相近。此外,韩宇平等[27]研究发现,华北平原水分对干燥指数的影响最大,其次是日照时数;张雪蕾等[28]研究发现,石羊河流域干燥指数对降水、日照时数和辐射较为敏感;张桉赫等[29]研究发现,对艾比湖绿洲干燥度指数最为敏感的是风速。由于受不同地域,不同气候等影响,气象因子对干燥度指数的敏感性有所差异,可见,研究结果具有一定的地区适应性。冬季干燥度指数最低,其次是夏季。冬季和夏季的气温与降水有着很大的差异,而干燥度指数相差不大,可见气象因子之间不是孤立的,是相互关联的。太阳辐射影响地表温度,气温同时又对地面蒸发产生一定的影响,从而影响了地域干燥度指数的变化。因此,气象因子对干燥度指数的影响还有待进一步研究确定。本研究仅研究了气象因子对干燥度指数的影响,还有许多间接的因子对干燥度指数产生影响,例如:植被、土壤、人类活动等。在今后的研究中还需加强对这些间接影响因子的研究。

6 结 论

(1) 1970—2016 年博斯腾湖流域干燥度指数平均值为 13.9,博斯腾湖流域属于干旱地区。研究区内干燥度指数整体呈现递减的趋势,1970—2016 年间干燥度指数有 2 个明显上升的阶段和 2 个明显下降的阶段。

(2) 5 个气象站点,巴音布鲁克站干燥度指数最低,巴音布鲁克干燥度指数的下降趋势通过了 99% 的显著性检验。巴伦台、和静、库尔勒、焉耆的干燥度指数也呈现递减趋势,焉耆未通过显著性检验。通过 *R/S* 分析,5 个站点干燥度指数的变化趋势都具有正持续性,与历史变化趋势相同。未来博斯腾湖流域干燥度指数呈下降的趋势。

(3) 通过年代季节距平发现,博斯腾湖流域在冬季干燥度指数最低,随着年代的变化干燥度指数随之减小。

(4) 不同站点气象因子对干燥度指数的敏感程度有所差异。总的来说,博斯腾湖流域平均气温和相对湿度与干燥度指数呈负相关。最高气温的敏感性最高,平均气温的敏感性最低。研究区内不同气象因子对干燥度指数的敏感程度为:最高气温 > 相对湿度 > 平均风速 > 最低气温 > 日照时数 > 平均气温。

参考文献(References):

〔1〕 IPCC. Climate Change 2013: Summary for Policymakers: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013: 1 – 28.

〔2〕 胡增运,胡汝骥,周启鸣,等. 亚洲中部干旱区干湿时空变化特征[J]. 干旱区研究,2018,35(2):260 – 268. [Hu Zengyun, Hu Ruji, Zhou Qiming, et al. Spatiotemporal variation of wetting or drying in the arid regions in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2):260 – 268.]

〔3〕 李淑萍,侯威,封泰晨. 近 52 年长江中下游地区夏季年代际尺度干湿变化及其环流演变分析[J]. 大气科学,2015,39(5):885 – 900. [Li Shuping, Hou Wei, Feng Taichen. Decadal variation of summer dryness/wetness over the middle and lower reaches of the Yangtze River and the evolution of atmospheric circulation in the last 52 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2015, 39(5):885 – 900.]

〔4〕 徐羽,许有鹏,吴艳飞,等. 近 50 年重庆市气象干旱时空分布特征研究[J]. 水土保持研究,2016,23(6):363 – 368. [Xu Yu, Xu Youpeng, Wu Yanfei, et al. Temporal and spatial patterns of the meteorological drought in Chongqing City during recent 50 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6):363 – 368.]

〔5〕 张利利,周俊菊,张恒玮,等. 基于 SPI 的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究[J]. 生态学报,2017,37(3):2 – 12. [Zhang Lili, Zhou Junju, Zhang Hengwei, et al. Temporal and spatial patterns of climate drought-wet and drought event based on standard precipitation index in Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3):2 – 12.]

〔6〕 赵俊芳,郭建平,徐精文,等. 基于湿润指数的中国干湿状况变化趋势[J]. 农业工程学报,2010,26(8):18 – 24. [Zhao Junfang, Guo Jianping, Xu Jingwen, et al. Trends of Chinese dry-wet condition based on wetness index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8):18 – 24.]

〔7〕 杨司睿,范井伟,孙永强,等. 罗布泊腹地人工植被梭梭的光学特性及其对干旱胁迫的响应[J]. 干旱区研究,2018,35(2):379 – 386. [Yang Sirui, Fan Jingwei, Sun Yongqiang, et al. Photosynthetic characteristics and response of *Haloxylon ammodendron* to drought stress in hinterland of the Lop Nur[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2):379 – 386.]

〔8〕 姚俊强,杨青,毛炜峄,等. 西北干旱区大气水分循环要素变化研究进展[J]. 干旱区研究,2018,35(2):269 – 276. [Yao Junqiang, Yang Qing, Mao Weiyi, et al. Progress of study on variation of atmospheric water cycle factors over arid region in Northwest

China〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(2):269 – 276.〕

〔9〕 陆咏晴,严岩,丁丁,等. 我国极端干旱天气变化趋势及其对城市水资源压力的影响〔J〕. 生态学报,2018,38(4):1 470 – 1 477.〔Lu Yongqing, Yan Yan, Ding Ding, et al. Drought trends and their impacts of pressures of urban water resources in China of precipitations〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2018,38(4):1 470 – 1 477.〕

〔10〕 杨育苗,蒋志荣,安力. 干旱胁迫下旱砂地籽瓜生理响应及其抗旱性评〔J〕. 干旱区研究,2018,35(3):735 – 742.〔Yang Yumiao, Jiang Zhirong, An Li. Physiological response and drought resistance of seed watermelons in dry sandy land〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(3):735 – 742.〕

〔11〕 廖要明,张存杰. 基于 MCI 的中国干旱时空分布及灾情变化特征〔J〕. 气象,2017,43(11):1 402 – 1 409.〔Liao Yaoming, Zhang Cunjie. Time and space distribution and disaster characteristics of drought in China based on MCI〔J〕. Meteorological Monthly,2017,43(11):1 402 – 1 409.〕

〔12〕 Nastos P T, Politi N, Kapsomenakis J. Spatial and temporal variability of the aridity index in Greece〔J〕. Atmospheric Research, 2013,119(1): 140 – 152.

〔13〕 王利平,文明,宋进喜,等. 1961—2014 年中国干燥度指数的时空变化研究〔J〕. 自然资源学报,2016,31(9):1 488 – 1 498.〔Wang Liping, Wen Ming, Song Jinxi, et al. Spatial-temporal variation of aridity index during 1961 – 2014 in China〔J〕. Journal of Natural Resources,2016,31(9):1 488 – 1 498.〕

〔14〕 王磊,褚荣浩,申双和,等. 西北地区干旱趋势变化特征及其对气候变化的响应〔J〕. 科学技术与工程,2017,17(34):8 – 16.〔Wang Lei, Chu Ronghao, Shen Shuanghe, et al. Variation characteristics of drought trend and its responses to climate change in Northwest China〔J〕. Science Technology and Engineering,2017, 17(34):8 – 16.〕

〔15〕 吴燕锋,巴特尔・巴克,罗娜娜. 1961—2012 年北疆干旱时空变化〔J〕. 中国沙漠,2017,37(1):158 – 166.〔Wu Yanfeng, Bake Batur, Luo Nana. Spatiotemporal pattern of drought in North Xinjiang, China in 1961 – 2012〔J〕. Journal of Desert Research, 2017,37(1):158 – 166.〕

〔16〕 王俊,陈亚宁,陈忠升. 气候变化与人类活动对博斯腾湖入湖径流影响的定量分析〔J〕. 新疆农业科学,2012,49(3):581 – 587.〔Wang Jun, Cheng Yaning, Cheng Zhongsheng. Quantitative assessment of climate change and human activities impact the inflowing runoff of Bosten Lake〔J〕. Xinjiang Agricultural Sciences, 2012,49(3):581 – 587.〕

〔17〕 郭梦京,周孝德,李鹏,等. 近 50 年博斯腾湖水位变化特征分析〔J〕. 水土保持研究,2015,22(2):52 – 57.〔Guo Mengjing, Zhou Xiaode, Li Peng, et al. Investigation of the changes in the water level of Bosten Lake in the past 50 years〔J〕. Research of Soil and Water Conservation,2015,22(2):52 – 57.〕

〔18〕 Riched A, Pereira L, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements〔M〕. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 15 – 73.

〔19〕 何庆龙,周维博,夏伟,等. 延安市近 60 年降水时空特征分析〔J〕. 水资源与水工程报,2018,29(1):31 – 37.〔He Qinglong, Zhou Weibo, Xia Wei, et al. Spatial-temporal characteristics about precipitation of Yan'an City in the past 60 years〔J〕. Journal of Water Resources and Water Engineering,2018,29(1): 31 – 37.〕

〔20〕 黄涛. 甘肃省兰州市近 40 年降雨特征分析及预测〔J〕. 环境工程,2017,35(增刊):650 – 654,606.〔Huang Tao. Analysis and prediction of rainfall characteristics in recent 40 years in Lanzhou City, Gansu Province〔J〕. Environmental Engineering, 2017, 35 (Suppl.):650 – 654,606.〕

〔21〕 董煜,海米提・依米提. 艾比湖流域径流水文特征及其对降水变化响应——以博尔塔拉河为例〔J〕. 水土保持研究,2014,21 (2):94 – 99.〔Dong Yu, Haimiti Yimiti. Runoff characteristics and responses to precipitation in the Ebinur Lake Basin: A case study of Boertala River〔J〕. Research of Soil and Water Conservation,2014,21(2):94 – 99.〕

〔22〕 郑红星,刘静. 东北地区近 40 年干燥指数变化趋势及其气候敏感性〔J〕. 地理研究,2011,30(10):1 765 – 1 774.〔Zheng Hongxing, Liu Jing. Long-term trends of aridity index and its sensitivity to climate factors in Northeast China:1971 – 2008〔J〕. Geographical Research,2011,30(10):1 765 – 1 774.〕

〔23〕 郑景云,尹云鹤,李炳元. 中国气候区划新方案〔J〕. 地理学报, 2010,65(1):3 – 12.〔Zheng Jingyun, Yin Yunhe, Li Bingyuan. A new scheme for climate division in China〔J〕. Acta Geographica Sinica,2010,65(1):3 – 12.〕

〔24〕 董煜,胡江玲,王瑾杰,等. 新疆 1961—2013 年参考作物蒸散量时空变异〔J〕. 水土保持研究,2016,23(3):304 – 308,313.〔Dong Yu, Hu Jiangling, Wang Jingjie, et al. Spatial and temporal variation of reference crop evapotranspiration in Xinjiang from 1961 to 2013〔J〕. Research of Soil and Water Conservation,2016,23 (3):304 – 308,313.〕

〔25〕 任国玉,袁玉江,柳艳菊,等. 我国西北干燥区降水变化规律〔J〕. 干旱区研究,2016,33(1):1 – 19.〔Ren Guoyu, Yuan Yujiang, Liu Yanju, et al. Changes in precipitation over Northwest China〔J〕 Arid Zone Research,2016,33(1):1 – 19.〕

〔26〕 郭旭新,赵英,高志永,等. 基于 SPEI 的陕北黄土丘陵区干旱特征及影响因素分析〔J〕. 西北林学院学报,2019,34(1):69 – 76.〔Guo Xuxin, Zhao Ying, Gao Zhiyong, et al. SPEI based drought characters and factors in Loess Hilly Region of Northern Shaanxi〔J〕. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34 (1):69 – 76.〕

〔27〕 韩宇平,张冰,黄会平,等. 华北平原干燥度指数时空分布特征及其影响因素分析〔J〕. 干旱区地理,2016,39(4):695 – 703.〔Han Yuping, Zhang Bing, Huang Huiping, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of dryness index and its influencing factors in North China Plain〔J〕. Arid Land Geography,2016, 39(4):695 – 703.〕

〔28〕 张雪蕾,王万瑞,王刘明,等. 石羊河流域干旱变化趋势及气候

影响因素〔J〕. 兰州大学学报(自然科学版),2017,53(5):598－603,608.〔Zhang Xuelei,Wang Wanrui,Wang Liuming,et al. Drought change trend and climate influencing factors in Shiyang River Basin〔J〕. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences Edition),2017,53(5):598－603,608.〕

〔29〕张桉赫,丁建丽,董煜,等. 新疆艾比湖绿洲干燥指数变化特征〔J〕. 干旱区研究,2019,36(1):244－252.〔Zhang Anhe,Ding Jianli,Dong Yu,et al. Change of aridity index in the Ebinur Lake Oasis,Xinjiang〔J〕. Arid Zone Research,2019,36(1):244－252.〕

Drought Change Trend and Its Affecting Climatic Factors in the Bosten Lake Basin

WANG Yuan[1], JIAO Li[1,2], DONG Yu[1]

(1. *College of Geographic Science and Tourism*, *Xinjiang Normal University*, *Urumqi* 830054, *Xinjiang*, *China*;
2. *Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone*, *Urumqi* 830054, *Xinjiang*, *China*)

Abstract: Aridity index (AI) is one of the important indices for characterizing a regional aridity/humidity status. It played an important role in developing the local agriculture and improving water resources management and ecological environment. Based on the meteorological data from five meteorological stations from 1970 to 2016 in the Bosten Lake Basin, the Penman-Monteith formula was used to calculate the potential evapotranspiration (ET_0), and then the values of aridity index were calculated via ET_0/precipitation. The multi-annual change characteristics of the aridity index were analyzed using the moving average, M-K, *R/S* analysis, etc. The sensibility of meteorological factors to aridity index was analyzed by sensibility analysis. The results showed that the average aridity index of the Bosten Lake Basin was 13.9, which revealed that the study area was arid. The aridity index of the Bostten Lake Basin during the period from 1970 to 2016 was decreased, and its change trend in the future would be similar as that in history. Seasonally, the aridity index of the Bosten Lake Basin was the lowest in winter, and it would be continuously decreased with the time. The sensitivity of meteorological factors to the aridity index was in an order of maximum temperature > relative humidity > average wind speed > minimum temperature > sunshine duration > average temperature.

Key words: Bosten Lake Basin; aridity index; sensitive coefficient